

A modeled approach to absolute velocity detection with ultrasound

Citation for published version (APA):

Ledoux, L. A. F. (1999). *A modeled approach to absolute velocity detection with ultrasound*. [Doctoral Thesis, Maastricht University]. Universiteit Maastricht. <https://doi.org/10.26481/dis.19991007II>

Document status and date:

Published: 01/01/1999

DOI:

[10.26481/dis.19991007II](https://doi.org/10.26481/dis.19991007II)

Document Version:

Publisher's PDF, also known as Version of record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.umlib.nl/taverne-license

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

repository@maastrichtuniversity.nl

providing details and we will investigate your claim.

Summary

Summary

In medicine, ultrasonic echography is the most widely used noninvasive imaging technique, because it produces images in real time that provide functional as well as morphological information in a relatively cheap and patient friendly way. Over the past decades, ultrasonic echography has evolved considerably. Nowadays, echographic systems are available that provide, aside of qualitative information, to some degree quantitative information. One of the main quantitative parameters that can be measured is the velocity component of moving blood or tissue in the direction of the ultrasound beam, i.e., in the axial beam direction. Ultrasonic echography is able to measure this velocity component with temporal and spatial resolutions that are better than are possible with other imaging techniques.

For clinical studies, the axial velocity component is less indicative than the absolute velocity. To obtain the absolute velocity, commercially available systems require information about the angle between the ultrasound beam and the direction of the absolute velocity component. Goniometry is applied to derive the absolute velocity from this angle in combination with the assessed axial velocity component. So far, the only medical measurement for which this angle is approximately known is the measurement of the blood flow velocity in a straight vessel. For such a measurement, it is assumed that the direction of the absolute velocity component is the same as the direction of the blood vessel. The angle between the blood vessel and the ultrasound beam is estimated by the user from the corresponding two dimensional echographic image of the longitudinal cross-section of the blood vessel.

This approach to assess the absolute velocity is only applicable for blood flow velocity measurements in straight vessels. For the measurement of, for example, absolute tissue motion, it is not applicable, because the angle between the absolute motion direction and the ultrasound beam can not be extracted from the echographic image and varies from position to position. Noninvasive echographic tissue motion measurements are very interesting, because they provide information about the deformation behavior of organs with high temporal and spatial resolutions without physical interaction of the measurement system.

In the current thesis, a method based on ultrasound is described for the measurement of absolute velocities. The method can be incorporated in conventional echographic scanners, because it is based on data acquired with a single ultrasound beam. The great advantage of the method is that it obtains the absolute velocity without requiring any information about the angle between the

absolute velocity component and the ultrasound beam. The method is able to determine, aside of the axial velocity component, also the local velocity component in the plane perpendicular to the ultrasound beam, i.e., the lateral velocity component. Simple goniometry is sufficient to derive from these two velocity components the absolute velocity at any point within the two dimensional plane of observation.

The axial and lateral velocity components are obtained by means of correlation of the radiofrequency (RF) signals (chapter 3). From literature, it is known that objects passing laterally through the ultrasound beam cause an amplitude modulation of the RF-signals repeatedly observed along the same line of observation. The amplitude modulation causes that the maximally obtainable correlation between subsequent RF-signals decreases with increasing temporal lag. It is experimentally demonstrated that the rate of temporal decorrelation is related to the lateral velocity and local characteristics of the ultrasound beam (beam width and curvature of wave front). A transducer with a circular beam shape is applied to make the rate of temporal decorrelation independent of the direction with which the lateral velocity component passes through the ultrasound beam. Furthermore, it is demonstrated that the correlation behavior of RF-signals is also dependent on the axial velocity, the bandwidth, center frequency, signal-to-noise ratio and sample frequency of the received RF-signals and the sound velocity in the medium under investigation.

The correlation between subsequent RF-signals can be calculated for different time and spatial lags. To establish the link between the value of such a correlation coefficient and the lateral velocity, an analytic model is derived that describes the correlation of the RF-signals considered (chapter 4). The model includes, besides the lateral velocity, also all the above mentioned parameters. Experimental evaluation of the correctness of that correlation model showed a very good resemblance between the correlation coefficients calculated from measured RF-signals and the ones predicted by the model.

From the analytic model for the correlation of RF-signals, estimators are derived for the local axial and lateral velocity components and for the local bandwidth, center frequency and signal-to-noise ratio of the received RF-signals (chapter 5). These estimators require for each local estimate only the calculation of a few correlation coefficients. The estimator for the lateral velocity requires also information about the local beam width and curvature of the wave front. Besides measurement of the entire ultrasound field, the easiest way to obtain this information is to acquire an

RF-data set while a large scattering object moves through the ultrasound beam with an exactly known velocity. From this data set, it is possible (using the estimators mentioned above) to derive a calibration curve that provides for each depth the desired information of the beam characteristics. This calibration curve has to be generated only once.

Experimental verification of the performance of the velocity estimators showed that spatial resolutions are possible on the order of two to four times the wavelength of the applied ultrasound frequency, which is equal to the resolution of the echo system used. For a 5 MHz transducer, the spatial resolution is in the range of 300 μm to 600 μm . Using spatially half-overlapping estimation windows, the gradual transition can be resolved with an even better precision. The temporal resolution depends on the applied pulse repetition frequency, but it is shown that for blood velocity measurements temporal estimation windows of 10 ms are feasible. Again, the application of temporarily half-overlapping estimation windows can resolve the gradual transition with an even better precision.

An advantage of the current axial velocity estimator is that it is not susceptible for aliasing. Its standard deviation is much lower than 1%, while the standard deviation of the lateral velocity estimator is slightly smaller than 10%. As a consequence of these deviations, the standard deviation of the absolute velocity estimates is smaller than 10%. The bias of the absolute velocity estimates is as far as could be observed much smaller than the standard deviation. With this precision, it is possible to determine the angle between the ultrasound beam and the direction of the motion (transducer-to-motion angle) with a standard deviation that is less than 2° .

For the in-vivo validation, the current velocity estimation technique is applied to measure the center stream velocity of the blood in the a. Carotis Communis. Blood flow velocity measurements with ultrasound require the application of a clutter filter to reject the echoes from the slowly moving vessel wall. In the present thesis, a clutter filter is introduced that is based on the Singular Value Decomposition (SVD) of the RF-signals (chapter 6). The concept of this filter is that the strongest common sub-signals in a set of consecutive RF-signals are removed in the entire set of signals, because these sub-signals are very likely to be caused by the slowly moving vessel wall. Some of the advantages of the SVD clutter filter are that it has no settling time and that it is almost independent of the signal-to-noise ratio of the clutter, because it has no roll-off. Furthermore, it adapts its behavior depending on

the velocity of the clutter, which makes the SVD clutter filter an attractive alternative if an adaptive clutter filter is required. Verification of the filter performance with data acquired with a conventional echographic system from the a. Carotis Communis demonstrated (off-line) that the SVD clutter filter indeed can be applied for RF-data acquired in-vivo (chapter 7).

After the RF-signals received from the a. Carotis Communis have been SVD clutter filtered, the data is used as input for the proposed angle-independent velocity estimators to measure the corresponding absolute center stream velocity (chapter 7). The results showed that the estimated center stream velocity waveform was indeed very close to the expected one in those cases that the clutter signals could completely be suppressed. From these results, it is concluded that the proposed method is suited for tissue motion assessments, since tissue motion measurements require no clutter filtering and have normally a much better signal-to-noise ratio. This will, for example, result in echographic systems that are able to evaluate noninvasively the regional myocardial deformation pattern, and hence the functioning of the heart, which would open a new clinical area of research.

Samenvatting

Echografie met behulp van ultrageluid is tegenwoordig een van de belangrijkste afbeeldingstechnieken in de medische geneeskunde. Een belangrijk pluspunt van de techniek is dat die in staat is om de op patiënt vriendelijke wijze verkregen anatomische informatie direct in beeldvorm te presenteren. Bovendien is echografie ook nog eens relatief goedkoop. Gedurende de afgelopen decennia zijn de mogelijkheden van echografische systeem aanzienlijk uitgebreid. Tegenwoordig zijn er systemen beschikbaar die, naast globale kwalitatieve informatie, ook tot op zekere hoogte kwantitatieve informatie presenteren. Een van de belangrijkste kwantitatieve parameters is de snelheidscomponent waarmee bloed of weefsel beweegt in dezelfde richting als de geluidsbundel, de zogenaamde axiale snelheidscomponent. Echografische systemen zijn in staat om deze snelheidscomponent te meten met tijd- en diepte resoluties, die veel beter zijn dan die van andere afbeeldingstechnieken.

Voor klinische studies is de axiale snelheidscomponent echter meestal minder indicatief dan de waarde van de absolute snelheid. Commercieel verkrijgbare echo systemen zijn echter (nog) niet in staat om deze absolute snelheid rechtstreeks te meten. Om deze snelheid te bepalen moet men weten hoe groot de hoek is tussen de as van de geluidsbundel en de richting van de absolute snelheidscomponent. Zodra die hoek bekend is kan op basis van goniometrie de absolute snelheid worden bepaald. De enige klinische meting waarbij deze hoek redelijk nauwkeurig kan worden ingeschat is bij de meting van de bloed stroomsnelheid in relatief rechte bloedvaten. Dan mag worden aangenomen dat de bewegingsrichting van het bloed hetzelfde is als de richting van het bloedvat. De hoek tussen het bloedvat en de as van de geluidsbundel moet door de gebruiker worden geschat uit het twee dimensionale echo beeld, dat een longitudinale dwarsdoorsnede van het bloedvat laat zien.

Deze aanpak om de absolute snelheid te meten werkt alleen voor de meting van de bloed stroomsnelheid in rechte bloedvaten. Voor het meten van de absolute waarde van weefselbewegingen bijvoorbeeld kan deze aanpak niet worden gevolgd, omdat de hoek tussen de richting van de bewegingscomponent en de as van de geluidsbundel niet kan worden afgeleid uit het echografische beeld en bovendien ook nog eens varieert van positie tot positie. Het niet invasief meten van weefsel bewegingen zou echter een interessante uitbreiding zijn voor de huidige generatie echo systemen, omdat dan ook informatie met goede tijd- en diepte resolutie kan worden verkregen over het bewegings- en vervormingsgedrag van organen zonder fysische interactie met het te meten object.

In het onderhavige proefschrift wordt een methode beschreven om met behulp van ultrageluid absolute snelheden te meten. Omdat er slechts gebruik wordt gemaakt van een enkele geluidsbundel is de methode zo eenvoudig van opzet dat die kan worden geïmplementeerd in conventionele echo systemen. Het grote voordeel is dat geen informatie meer noodzakelijk is over de hoek tussen de bewegingsrichting en de geluidsbundel. Dit komt doordat de methode in staat is om naast de axiale snelheidscomponent ook de snelheidscomponent in het vlak loodrecht op de geluidsbundel, de zogenaamde laterale snelheidscomponent, te bepalen. Eenvoudige goniometrie is vervolgens voldoende om aan de hand van deze twee snelheidscomponenten de absolute snelheid te bepalen op ieder punt binnen het twee dimensionale vlak van waarneming.

De axiale en laterale snelheidscomponenten worden bepaald met behulp van correlatie van de terugontvangen radiofrequente (RF) signalen (Hoofdstuk 3). Uit de vakliteratuur is het reeds geruime tijd bekend, dat objecten die de geluidsbundel in laterale richting doorkruisen een amplitude modulatie veroorzaken bij de opeenvolgende, langs dezelfde richting van observatie terugontvangen, RF-signalen. Door deze amplitude modulatie neemt met het toenemen van de tijdstap tussen de opeenvolgende RF-signalen het maximaal haalbare niveau van de correlatie af. Het is experimenteel aangetoond dat de mate van correlatie afname gerelateerd is aan de laterale snelheid en lokale eigenschappen van de geluidsbundel (bundel breedte en kromming van het golffront). Verder hebben experimenten aangetoond dat het correlatie gedrag van RF-signalen afhankelijk is van de axiale snelheid, de bandbreedte, draaggolffrequentie, signaal-ruis-verhouding en bemonsteringsfrequentie van de ontvangen RF-signalen en van de geluidssnelheid in het medium waarin gemeten wordt.

De correlatie tussen opeenvolgende RF-signalen kan worden uitgerekend voor verschillende tijd- en diepte stappen tussen de signalen. Om de relatie tussen de waarde van een correlatie coëfficiënt en de laterale snelheid te leggen is een analytisch model afgeleid dat dit correlatie gedrag beschrijft (Hoofdstuk 4). Dit model bevat naast de laterale snelheid alle hierboven genoemde parameters. De juistheid van het model is experimenteel aangetoond. Vergelijking van de aan de hand van gemeten data berekende correlatie coëfficiënten met die voorspeld door het model toont een goede overeenkomst.

Het model voor de correlatie van RF-signalen is gebruikt om schatters af te leiden voor de lokale axiale en laterale snelheden en voor de lokale bandbreedte,

draaggolffrequentie en signaal-ruis-verhouding van de ontvangen RF-signalen (Hoofdstuk 5). Voor iedere lokale schatting hoeven deze schatters slechts enkele correlatie coëfficiënten uit te rekenen. De schatter voor de laterale snelheid heeft bovendien nog enige informatie nodig over de lokale bundelbreedte en kromming van het golffront. Deze informatie kan worden verkregen door het hele geluidsveld van de transducent te meten, maar een eenvoudigere manier om die informatie te verkrijgen is om één keer een RF dataset op te nemen terwijl een object met bekende snelheid door de geluidsbundel passeert. Met behulp van deze dataset en de hierboven genoemde schatters is het mogelijk om een calibratie curve te creëren die voor iedere diepte de gewenste geluidsbundel informatie geeft.

Experimenteel is aangetoond dat met deze schatters een diepte resolutie mogelijk is in de orde van twee tot vier keer de golflengte van de gebruikte ultrageluids-frequentie. Deze resolutie komt overeen met de resolutie van het gebruikte echo systeem en ligt voor een 5 MHz transducent in tussen de 300 μm en 600 μm . Als in de diepte richting ook nog eens halfoverlappende schattingsgebieden worden gebruikt, dan zal de geleidelijke overgang met een nog betere plaats nauwkeurigheid worden bepaald. De tijdsresolutie hangt af van de gebruikte puls herhalings frequentie, maar het is aangetoond dat voor bloedstroomsnelheids-metingen tijdvensters van 10 ms mogelijk zijn. Wederom kan de geleidelijke overgang, maar nu in de tijd richting, met een betere nauwkeurigheid worden bepaald als halfoverlappende tijdvensters worden gebruikt.

Een voordeel van de huidige schatter voor de axiale snelheid is dat deze tot zeer hoge snelheden juist functioneert. De standaard deviatie van de axiale schatter is veel kleiner dan 1%, terwijl de standaard deviatie van de laterale snelheidsschatter iets lager is dan 10%. Als een gevolg van deze deviaties is de standaard deviatie van de absolute snelheidsschatting iets kleiner dan 10%. De bias op de absolute snelheidsschatting is voor zover als kon worden waargenomen veel kleiner dan de standaard deviatie. Met deze nauwkeurigheden van de schattingswaarden kan de hoek tussen de richting van de beweging en de as van de geluidsbundel worden bepaald met een standaard deviatie die kleiner is dan 2° .

Voor de in vivo validatie zijn de nieuwe snelheidsschatters toegepast voor het meten van de snelheid van de bloedstroming in het midden van de halsslagader. Voor het meten van de snelheid van de stroming van bloed is het gebruik van een vaatwand filter vereist om de sterke echo's van de langzaam bewegende vaatwand te onderdrukken. In het onderhavige proefschrift is een vaatwand filter

geïntroduceerd dat is gebaseerd op Singular Value Decomposition (SVD) van de RF-signalen (Hoofdstuk 6). Het concept van het filter is dat de sterkste gemeenschappelijke signalen in een set van RF-signalen worden verwijderd, omdat deze gemeenschappelijke sterke signalen zeer waarschijnlijk worden veroorzaakt door de langzaam bewegende bloedvatwand. Enkele voordelen van dit SVD vaatwand filter zijn, dat het geen inschakeltijd heeft en dat het nagenoeg ongevoelig is voor de signaal-ruis-verhouding van de van de vaatwand afkomstig zijnde echoes omdat het filter geen roll-off heeft. Bovendien past het filter zijn gedrag aan aan de snelheid waarmee de vaatwand beweegt. Dit maakt het SVD filter een aantrekkelijk alternatief als een filter met adaptieve eigenschappen is gewenst. Verificatie van het gedrag van het filter met data ingevangen met een conventioneel echo systeem van de halsslagader toont aan dat het SVD vaatwand filter de verwachte eigenschappen heeft en in de praktijk inderdaad kan worden toegepast (Hoofdstuk 7).

Nadat de RF-signalen zijn gefilterd met het SVD vaatwand filter, zijn ze gebruikt als invoer voor de meethoek onafhankelijke snelheidsschatters voor het meten van het bloed stroom snelheidsprofiel in het midden van de a. Carotis Communis (hals-slagader) (Hoofdstuk 7). De resultaten van de evaluatiestudie tonen aan dat, nadat het vaatwand filter alle storende signalen goed heeft onderdrukt, het door de snelheidsschatters berekende bloed stroomsnelheidsprofiel goed overeenkomt met het verwachte profiel. Uit deze resultaten mag worden geconcludeerd dat de voorgestelde methode voor het meten van de absolute snelheid ook toepasbaar zal zijn voor het meten van weefsel bewegingen, zeker omdat voor het meten van weefsel bewegingen geen filtering nodig is en de signaal-ruis-verhouding veel beter is. Het moet daarom mogelijk zijn om echo systemen te maken die in staat zijn om op niet invasieve wijze het regionale vervormingspatroon van het myocard te bepalen om aan de hand daarvan het functioneren van het hart in kaart te brengen. Een dergelijk systeem zou daarom een nieuwe mogelijkheid bieden voor klinisch onderzoek op dit gebied.